

# $\text{Cr}^{4+}$ YAG 在 Nd YAG 激光器中的被动调 Q\*

何江流 王加贤

(华侨大学电气技术系, 泉州 362011)

**摘要** 在考虑  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 激发态吸收的情况下, 给出调 Q 速率方程组, 并且利用计算机对该方程组进行数值求解. 从而, 描绘出调 Q 过程中相关粒子数的变化情况, 得到脉冲宽度、脉冲能量、峰值光功率的理论值. 采用  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 晶体作为可饱和吸收体, 在脉冲式 Nd YAG 中实现了  $1.06 \mu\text{m}$  激光的调 Q 运转. 实验结果与理论结果相符合.

**关键词**  $\text{Cr}^{4+}$  YAG, 被动调 Q, 速率方程组, 数值解

**分类号** TN248.3<sup>+</sup>4

近年来, 掺四价铬离子( $\text{Cr}^{4+}$ )的晶体作为  $\text{Nd}^{3+}$  激光器的被动 Q 开关, 引起了人们广泛的研究兴趣<sup>[1,2]</sup>. 在  $1.06 \mu\text{m}$  的激光波段上, 这类晶体有着大的吸收截面和低的饱和吸收光强, 并且具有光化学性质稳定、导热性能好、损伤阈值高等优点. 它既可以被用作脉冲式激光器的 Q 开关, 也可以作为连续激光器的 Q 开关. 本文在考虑激发态吸收的情况下, 从描述  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 调 Q 激光器的速率方程组出发, 通过计算机模拟和公式计算, 可以得到脉冲宽度、脉冲能量、峰值光功率的理论值. 并且利用  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 在脉冲式 Nd YAG 激光器中进行被动调 Q, 获得了脉宽为 20 ns, 能量为 125 mJ 的稳定调 Q 脉冲输出.

## 1 理论分析和计算

$\text{Cr}^{4+}$  YAG 晶体属于四能级系统, 其可饱和吸收特性可由图 1 的四能级模型来描述.  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 晶体对波长为  $1.06 \mu\text{m}$  的光吸收特性, 一个显著的特点就是它有较强的激发态吸收, 其基态和激发态吸收截面分别为  $\sigma_g = 7 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ ,  $\sigma_e = 5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ . 另一特点是其饱和吸收的恢复时间

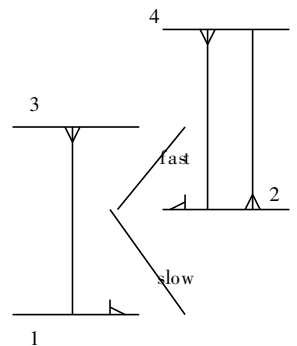


图1  $\text{Cr}^{4+}$  YAG晶体的能级图

较长, 达到微秒量级, 第一激发态(能级 2)的弛豫时间  $\tau_1 = 3.4 \mu\text{s}$ . 这类激发态寿命比调 Q 脉宽长很多的饱和吸收体, 属于慢饱和吸收体. 饱和吸收体被动调 Q 的理论分析, 一般基于速率方程. 对于  $\text{Cr}^{4+}$  YAG, 考虑它的激发态吸收以及慢饱和吸收体的特性, 可以得出激光腔中光子数密度  $\varphi(t)$ 、激活介质反转粒子数密度  $n(t)$ 、饱和吸收体基态原子数  $n_1(t)$  相互耦合的

微分方程组. 即

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{Q(t)}{t_r} \times [2l\sigma n(t) - 2\sigma_g dn_1(t) - 2\alpha d(n_0 - n_1(t)) - \ln(1/R) - \delta], \tag{1}$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\gamma\sigma_c Q(t)n(t), \tag{2}$$

$$\frac{dn_1(t)}{dt} = -\sigma_g c Q(t)n_1(t). \tag{3}$$

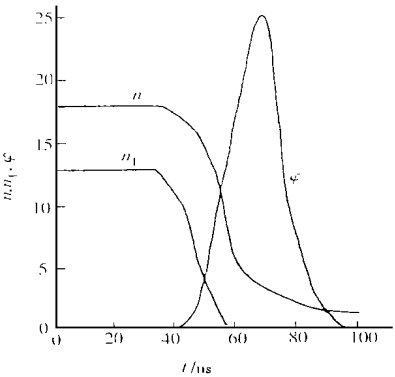
在式(1)~(3)中,  $\sigma, l$  分别为激活介质的受激发射截面( $\text{cm}^2$ )和长度( $\text{cm}$ );  $\sigma_g, \sigma_c$  分别为  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 的基态和激发态的吸收截面( $\text{cm}^2$ );  $n_0$  是  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 中  $\text{Cr}^{4+}$  粒子数密度( $\text{cm}^{-3}$ );  $d$  为  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 晶体的通光长度( $\text{mm}$ );  $R$  为输出反射镜的反射率;  $\delta$  为激光器的耗散性损耗; 光在腔中往返一周的时间为  $t_r, t_r = 2L/c, L$  为光学谐振腔的长度( $\text{cm}$ ),  $c$  是光速,  $\gamma$  为反转因子,

对于四能级系统  $\gamma = 1$ . 对联立方程(1~3)进行数值求解, 可得到  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 被动调 Q 脉冲的理论结果. 即腔内光子数密度  $Q(t)$ 、激活介质反转粒子数密度  $n(t)$ 、吸收体基态原子数  $n_1(t)$  随时间的变化曲线, 其中  $Q(t)$  正好描述了输出的调 Q 光脉冲的波形. 我们采用表 1 所列的参数进行计算, 所得的结果如图 2 所示. 其中图 2(a)采用常值坐标, 很好地反映了输出脉冲的波形(图中为方便起见,  $Q(t), n(t), n_1(t)$  被分别乘以  $6 \times 10^{-18}, 2 \times 10^{-17}$

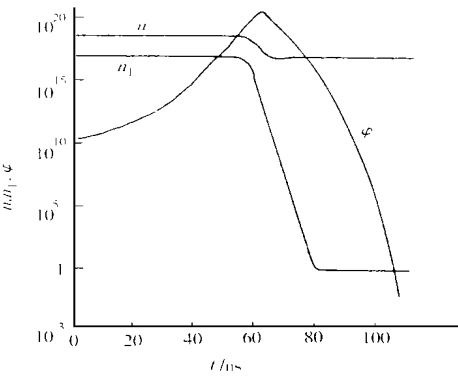
表 1 方程(1~3)中的相关计算参数<sup>①</sup>

$\sigma$	$5.4 \times 10^{-19}$	$\gamma$	1
$\sigma_g$	$7.0 \times 10^{-18}$	$l$	8
$\sigma_c$	$5.0 \times 10^{-19}$	$d$	2
$\delta$	0.408	$R$	0.15
$n_0$	$4.62 \times 10^{18}$	$L$	60

①  $\sigma, \delta$  引自文献 [3],  $\sigma_g, \sigma_c$  引自文献 [2],  $n_0$  的值由公式  $T_0 = \exp(-\sigma_c n_0 d)$  计算得到,  $T_0$  是  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 的小信号透过率



(a) 采用均匀坐标



(b) 采用对数坐标

图 2 方程(1)~(3)的数值计算结果

和  $0.6 \times 10^{-16}$ ); 图 2(b)采用对数坐标, 则较好的反映了各粒子数的实际值. 由图 2 可以看出, 计算机模拟所得的脉冲宽度约为 18 ns. 图中还清楚地展示了调 Q 的物理过程. 即 Q 开关打开后, 腔内光子数密度迅速增加, 而增益介质中的反转粒子数迅速减小; 当反转粒子数降低到阈值时, 光强达到最大; 此后, 反转粒子低于阈值, 激光不再放大, 而且由于腔的损耗, 光强开始减弱, 从而形成一个强的激光脉冲输出.

按照文献 [4]的方法, 还可以根据图 2 计算脉冲的能量  $E$ 、峰值功率  $P$ . 即

$$n_{i0} = \frac{\ln(1/R) + \delta \ln(1/T_0^2) + \delta}{2\alpha l}, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_E}{\gamma\sigma}, \quad (5)$$

$$E = \frac{h\nu A}{2\gamma\sigma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right), \quad (6)$$

$$P = \frac{h\nu A l}{\gamma t_r} \ln(1/R) \left\{ n_i - n_t - n_{i0} \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) - (n_i - n_{i0}) \left[ 1 - \left(\frac{n_t}{n_i}\right)^\alpha \right] \right\} \alpha. \quad (7)$$

在式(4)~(7)中, 参数  $n_{i0}$  实际上代表  $\alpha$  情况下脉冲峰值时的反转粒子数密度,  $n_i$  为初始反转粒子数密度,  $n_t$  为脉冲结束时的反转粒子数密度,  $n_t$  为脉冲峰值时的反转粒子数密度,  $A$  为光束在  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 晶体中的有效横截面积,  $h\nu$  是  $1.06 \mu\text{m}$  光的光子能量. 由式(4)可得  $n_{i0} = 2.74 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 由图 2 得  $n_i = 9.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $n_t = 3.89 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $n_t = 2.83 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . 将  $n_i$ ,  $n_t$  代入式(6), 得到  $E = 142 \text{ mJ}$ , 将  $n_{i0}$ ,  $n_t$ ,  $n_t$ ,  $\alpha$  代入式(7), 得到  $P = 8.1 \times 10^6 \text{ W}$ .

## 2 实验研究

### 2.1 实验装置

在实验中, 由平面镜  $M_1$  和全反射凹面镜  $M_2$  构成平凹腔. 输出镜  $M_1$  的透过率为 15%,  $M_2$  的曲率半径为 3 m.  $F$  为可变光阑, 用来抑制高阶横模振荡以保证激光器基横模运转.  $L$  为  $4.5 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$  的 Nd YAG 棒由两根脉冲氙灯泵浦, 其左端面与  $M_1$  镜距离 120 mm, 右端面与  $M_2$  镜的距离在实验中调整以改变腔长. 实验装置如图 3 所示. 激光器的工作重复率为每秒 1 次.  $\text{Cr}^{4+}$

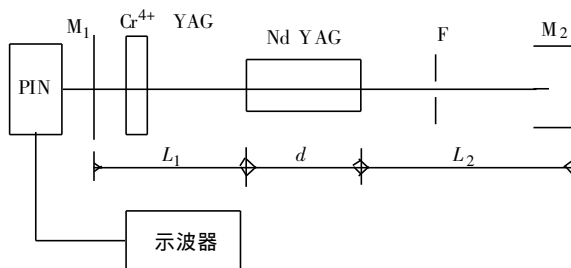


图3 Nd YAG激光器中 $\text{Cr}^{4+}$  YAG被动调Q的实验装置

YAG 晶体通光长度为 2 mm, 对  $1.06 \mu\text{m}$  连续光的小信号透过率为 63%. 晶体用钼皮包裹并加水冷. 脉冲能量由 PT-1 型激光能量计测量, 脉冲波形由 PIN 管构成的探测器接收, 并输入到惠普公司 54502A 型 400 MHz 数字示波器上进行存储和显示.

### 2.2 实验结果

在腔长  $L = L_1 + L_2 + d/n_0 = 60 \text{ cm}$  ( $d$  为 Nd YAG 棒的长度,  $n_0$  为棒的线性折射率), 泵浦能量为 110 J 的条件下, 我们获得了非常稳定的光滑的调 Q 脉冲波形, 如图 4 所示. 从图中可以看出, 单脉冲的半功率点宽度约为 20 ns. 改变示波器的扫描速度, 可以看出序列中脉冲间隔为 20  $\mu\text{s}$ , 输出的能量经测量为  $E = 125 \text{ mJ}$ , 脉冲能量的峰值功率  $P = E/T = 6.25 \times 10^6 \text{ W}$ . 这与前面的理论结果相当接近.

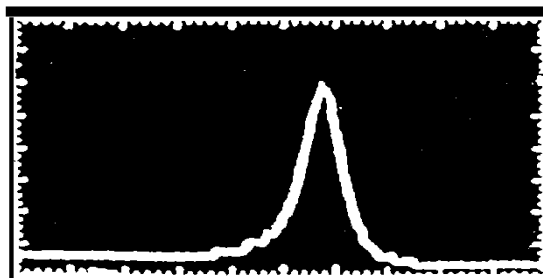


图4 单脉冲调Q波形(水平坐标  $20 \text{ ns} \cdot \text{div}^{-1}$ )

### 3 结束语

$\text{Cr}^{4+}$  YAG 晶体具有宽的吸收带和良好的饱和吸收特性,并且光化学稳定性和导热性能都很好.因此,它是高功率、高重复率及小型全固化激光器的理想的被动 Q 开关.本研究用  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 晶体在脉冲式 Nd YAG 激光器中调 Q,获得脉宽为 20 ns,能量为 125 mJ 的巨脉冲.而且在调 Q 速率方程组的基础上,利用计算机数值求解,描绘出调 Q 过程中各参数的变化,理论结果和实验结果基本相符合.

本文为校科研资金资助项目.

### 参 考 文 献

- 1 欧阳斌,丁彦华.  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 的可饱和吸收特性与被动 Q 开关性能研究. 光学学报, 1996, 16(12): 1555 ~ 1669
- 2 王加贤,张文珍.  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 被动调 Q 与被动锁模的研究. 华侨大学学报(自然科学版), 1999, 20(1): 25 ~ 29
- 3 赵圣之,张行愚,王青圃等. NYAB 晶体  $\text{Cr}^{4+}$  YAG 被动调 Q 的激光特性的研究. 中国激光, 1999, A26(1): 6 ~ 10
- 4 Xinyu Zhang, Shengzhi Zhao, Qingpu Wang. Optimization of  $\text{Cr}^{4+}$ -doped saturable-absorber Q-switched lasers. IEEE J. of Quantum Electronics, 1997, 33(12): 2286 ~ 2294

## $\text{Cr}^{4+}$ YAG Passive Q-Switching in Nd YAG Laser

He Jiangliu      Wang Jiaxian

(Dept. of Elec. Tech., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** Taking into account the absorption of  $\text{Cr}^{4+}$  YAG in excitaion state, the Q-switching rate equations are given and the equations are solved numerically by using computer. Thus the change of correlated population during Q-switching is described and the theoretical values of pulse width and energy of pulse and peak luminous power are obtained. By adopting  $\text{Cr}^{4+}$  YAG as saturable absorber, the Q-switching operation of 1.06 $\mu\text{m}$  laser is realized in pulsive Nd YAG.

**Keywords**  $\text{Cr}^{4+}$  YAG, passive Q-switching, rate equations, numerical solution